原子核大振幅集団運動論 : 原子核集団運動の発生・進化・消滅の力学(基研長期研究会「進化の力学への場の理論的アプローチ」報告,研究会報告)

坂田, 文彦

原子核大振幅集団運動論
―原子核集団運動の発生・進化・消滅の力学―

東大核研　坂　田　文　彦

ここでは研究会で述べた事柄の基礎となる考え方について述べる事とする。特に大振幅集団運動論から「進化の力学」の視点の重要性を指摘する。

1. マクロ物理とミクロ物理との相互関係を原子核物理の立場から見るなら，原子核全体としての運動を特徴付ける集団的（コヒーレントな）運動の従う力学とそれ以外の大量な独立粒子的運動の従う力学という二つの質的に異なる階層に属する力学の相互関係という事になる。この相互関連を多様な現象を通じて明らかにしようという立場はBohr-Mottelson以来の立場であるが，この課題へのアプローチは理論物理の発展の中で新しい段階へと発展しつつある。

2. 原子核は有限量子多体系・自己束縛系である。近年の研究によりこの系には様々な平衡一体場・或はそれによって特徴付けられる多様な「相」が実現・共存している事が明らかにされてきた。即ち特徴的な励起状態群を多数の励起状態から採り出すと，それは集団的運動の振幅で規定される（古典的乃至マクロ的）外部パラメーターを含んだ平衡一体場で良く記述されるのである。（大量の量子状態の中から多重相関をとる事により選択的結び付いている励起状態群が60ℏの角運動量状態まで離散的準位として測定しうるような実験技術の進歩により，実験的にも核分光学は新たなる領域を開拓しつつあるのである。）原子核の最も大きな特徴は，この様な平衡一体場の中を運動している独立粒子的運動と，その一体場を特徴付けている（断熱的）集団運動とがともに核子自由度の従う微視的力学（これをマクロ物理と呼ぶべきか？）によって支配されているという点にある。勿論集団運動が極めて良く成長し断熱的取扱いが十分良い近似として成立つ場合には，原子衝突における原子間距離を外部パラメーターとした電子の一体場と同じ取扱いが可能となり，準位交差に伴なう断熱位相が意味を持ちうるが，集団運動が余り成長していない場合には，この様な取扱いは意味を失なう。

3. 原子核物理の基本的な課題の一つは，独立粒子間運動と集団的運動との特徴的なタイム・スケールが同程度の場合から，断熱的取扱いが可能な場合までの移行の動力学を核子の従う運動方程式を基礎として明らかにする点にある。核子は有限個集まって自己束縛系を作り，このような孤立した原子核系においては飽和性を満す自己無撞着な平均一体場描像が良く成り立っている。従って核内核子の従う運動方程式はこの自己無撞着性に帰因する強い非線形性を持つ事となる。従って先の基本的課題は強い非線形力学に従う核内核子の運動から，タイム・スケールの異なる集団運動と非集団運動が如何に分化・発生し，そして成長していくのかを明らかにする事にある。

4. 量子系の問題を平均一体場近似の枠内で捉えると古典的描像での議論が可能となる。この様な「古典的」描像では，集団運動とは安定な部分多様体上の周期的運動に対応する事となり，集団座標（マクロ変数）とは部分多様体を記述する必要最少な正準変数に対応する。集団運動の成長とは位相空間のストカスティックな構造の中に如何に周期的秩序構造が発生し，そして位相空間全体を安定な秩序構造へと変えていくのかの力学であると云えよう。平衡な一体場近傍の微小な領域での線形近似・ＲＰＡは古典的には周期解に対応しており，基準座標の一つを集団座標と見做す事が可能である。しかし，平衡一体場から遠く離れた大振幅な集団運動を記述する場合には，ＲＰＡの如き局所理論では不充分となり，大域的な領域で意味を持つ集団座標の導入が重要となるのである。このような大域的な集団運動を記述しうるRelevant自由度は，直観的・人為的に外から持ち込まれるべき量ではなく，系の構成子の従う微視的力学の結果として多体系自からが選択していく動力学的対象として捉えようというのが大振幅集団運動論の基本的立場である。それは，位相空間内の安定な部分多様体を記述する必要最小な正準座標を動力学的に求める理論：自己無撞着集団座標の方法として定式化されている。

5. 或る平衡一体場が不安定となり，別の平衡一体場が安定化してくる機構，すなはち有限系における相転移の機構は，Relevant自由度を外部パラメータとして含む平均一体場によって特徴付けられる一粒子運動の準位交差の問題と関係しており，基底状態（真空）の変化・アノーマリーの問題と関係していると考えられる。実際原子核の回転が速くなると，一体場内の粒子はコリオリ力を受け，回転軸に整列する現象が多く見つけられているが，これは丁度基底状態が変化する機構として理解されているのである。そして平衡一体場の不安定性は，それを特徴付けている（断熱的）集団運動の不安定性を意味し，集団運動の消滅或は散逸（Rotation Damping, Band termination）の機構と関係していると考えられる。

6. 原子核においても平衡一体場から可成離れた領域・独立粒子運動が多量に励起した領域では〝統計的〟手法が役立ち，「温度」という概念が意味を持ちうる現象が存在する。平衡一体場近傍からこの様な高励起状態への変化は，有限系において統計性が如何に発生するかの力学を明らかにしうる新しい領域を提供しているのである。ここでもどの自由度がRelevant自由度（マクロ変数）として取扱かわれるべきか，そしてどの自由度がIrrelevant自由度として消去されるべきものなのかが重要な問題として存在する。この分離は原子核のような有限系においては，直観的・人為的に行なわれるべきものではないからである。更にこの分離を動力学的に行なっても（自己無撞着集団座標の方法で分離できる），Irrelevant 自由度を統計的な“熱浴”と見做すような通常のNakajima-Zwanzicの射影法を用いる事は出来ない。むしろcoupled Master方程式から出発し，3. で議論したRelevantとIrrelevant自由度のtime scaleの違いに関連した非マルコフ効果の取扱いの中から，集団運動の散逸機構力学・輸送方程式の導出条件が明らかにされ，それの極限として，Irrelevant自由度がカノニカル・アンサンブルと見做しうる状況が想定されうると考えられる。

7. 以上のように，原子核においても「進化の力学」という立場は極めて重要な観点であり，集団運動の従う力学を，その分化・発生から成長・進化を通じ消滅・散逸していく動力学的機構として択えられる状況が明確になりつつあると云えよう。しかもこのような統一的理解を可能としているのは，原子核が有限な系であるという事が重要であるように思われる。

Quantum Field Theory of Thermal Diffusion

学習院大学　江沢　洋
明治大学　中村孔一
明星大学　渡辺敬二

1. はじめに

温度が不均一な系の非可逆過程すなわち熱伝導や熱拡散の問題を場の理論に基づいて扱うことが我々の目的である。これらの非可逆過程は今まで多くの人々により論じられたが，それは master equation とか Boltzmann 方程式によるものであり場の理論を出発点とする理論はまだ完成されていない。

系の温度の不均一さは初期条件として次のようにして導入される[1] はじめに系は均一な温度 T_0 にあると仮定し，ある時刻 $t=-T$ において温度を $\beta_0=1/kT_0 \rightarrow \beta_0+\beta_a(X)$ と変化させる。ここで $\beta_a(X)$ は場所の関数で $|\beta_a(X)| \ll \beta_0$ とする。系の化学ポテンシャル μ は温度が不均一になった直後も場所によらない一定値にしておく。この初期条件を与えて系を放置したとき拡散流や熱流が時間の関数としてどのように変化するかを調べる。

ここでは thermo field dynamics を温度勾配のあるボース粒子からなる系に適用することにより熱拡散の問題を考える。まず時刻 $t=-T$ 以前には粒子間の相互作用がないと仮定し thermal state を構成する。時刻 $t=-T$ に相互作用を入れ $t=T$ に切ることにする。current を $J_\mu(x)$ とするとその平均値 $<J_\mu(x)>$ は不均一な温度の系に対し 0 と異る値をもつ。Zubarev は一種類の粒子のみからなる系に対しては熱拡散がないことを示しているが，[2] 我々の初期条件は彼の条件とは異っており熱拡散流が実際に存在し得ることに注意しておく必要がある。

Sec. 2 では thermo field dynamics による $<J_\mu(x)>$ の表式を与える。相互作用表示を Sec. 3 に導入し，Gell-Mann Low の方法を用いることにより $<J_\mu(x)>$ が Feynman diagram により計算されることを示す。Sec. 4 では相互作用のあるボース粒子の系に対し一体 Green 関数，self energy，補正されたポテンシャルの Dyson 方程式を導きその近似解を構成する。$<J_\mu(x)>$ が拡散方程式を満すことを Sec. 5 で示す。